超常环境下系统力学问题研究与验证

力学是工程技术的基础。20 世纪人类在航空航天、原子能利用和大型机械设备等领域取得的突出成就便是力学和工程技术结合的典型案例。当前，力学学科已经从经典力学，经过应用力学和技术科学，发展到系统力学的新阶段，人类的众多重大工程需求迫切需要发展系统力学的新理论和新方法。超常环境下系统力学问题研究与验证专项拟通过高超声速巡航飞行、高速列车长时间安全服役、深海油气高效分离与输运等重大工程和复杂介质系统典型案例，按照系统力学的研究思路，揭示它们在超常环境下工作及服役的力学原理，提出系统解决方案，突破高超声速巡航飞行、高速列车的载荷谱分量预测和系统优化、深海油气水高效分离和输运等关键技术，并进行试验验证。同时，面向复杂介质系统力学国际前沿科学问题，研究多相、多场、多尺度和多过程的耦合机制，发展系统力学新理论，引领力学学科发展方向，凝聚一支系统力学研究队伍。

1 立项背景和依据

在空天、交通和能源等战略领域，日益紧迫的国家需求，如空天安全保障、高速列车长时间安全服役、深海油气资源开发等，均涉及重大工程系统在超常环境下的可行性、安全性和经济性。这些问题的提出，要求力学的研究对象从已相对熟悉的常规环境下的某一或某类部件，向超常环境下的工程系统延伸。后者通常涉及因素众多，且相互影响牵制，加之超常环境试验条件常常很难实现，对力学学科，形成了新的挑战，也提供了难得的发展机遇。

力学是自然科学中最先成熟，也是与重大工程联系最密切的学科之一。回顾力学的发展，从牛顿算起，已有300多年的历史。按照学科前沿演进的特点，大致可以划分为经典力学、应用力学、技术科学和系统力学 4 个阶段。经典力学阶段，大约经历了 200 年，在此期间，力学的理论框架有很大的发展，并为近代科学发展提供了基本范式。20 世纪初，以边界层理论为标志，应用力学兴起，其特点是力学与重大工程的有机结合。20 世纪中叶，随着航天工程和核工业的发展，作为工程技术的理论基础，经典力学已不够用，当时处于力学研究前沿的科学家，如钱学森等人，敏锐地洞悉这一点，通过学科交叉并与应用结合，推动了力学向技术科学方向发展。

与前 3 个阶段相比，系统力学的着眼点，在于重大工程和复杂介质系统层面的核心问题，在于明晰系统层面的力学原理和技术路线的可行性，考察系统在运行或服役过程中的安全性、可靠性、经济性等的重要影响因素，它们之间的耦合规律和定量关系，并在此基础上，致力于探索和发现变革性技术途径和总体优化方案。与传统的自然科学还原论相比，系统力学研究方法强调单因素向多因素、局部向全局、解耦或弱耦合向强耦合的转变，强调力学原理与重大工程系统需求的融合。

系统力学的发展需要在广泛的研究领域培养和培育创新点。因此，本专项针对高超声速巡航飞行、高速列车长时间安全服役、深海油气高效开采等典型重大工程的系统性、多因素耦合性、服役环境的超常性以及力学学科前沿研究的复杂系统的多尺度性、多场耦合性、多学科交叉融合性等新的特点，在新兴科技与战略领域设置前沿基础性研究课题，在系统层面上开拓新思路、发展新理论、探索新方法，对解决重大工程系统的基础理论问题和发展力学学科均具有重大意义。

2 专项布局

专项共设置4个项目（图1）。项目一：高超声速巡航飞行新途径与试验验证；项目二：高速列车长时间服役的安全可靠性；项目三：深海油气水高效分离和输运技术；项目四：复杂介质系统前沿与交叉力学。

这4个项目通过典型案例的研究，着眼于发展原创性的系统力学基础理论，将重点突破超常工程环境下高超声速巡航飞行、高速列车长时间服役安全可靠性、深海油气水高效分离和输运等重大需求的系统理论问题和关键技术，并在健康仿生、能源环境、舰船安全等领域培育系统力学的新生长点。

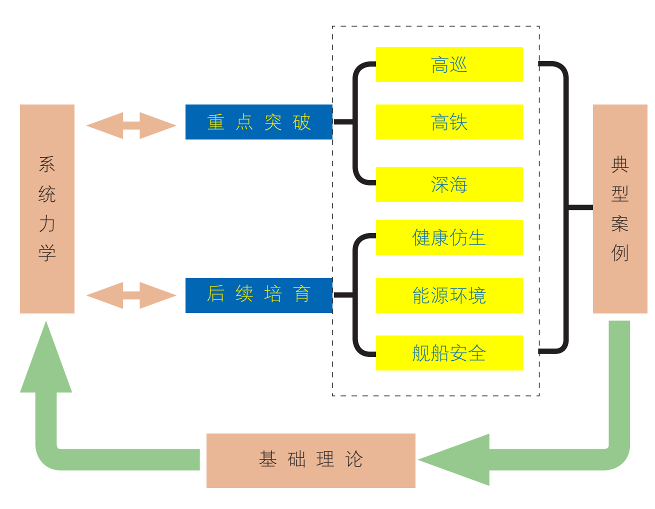


图1 超常环境下系统力学问题研究与验证专项总体布局图

专项依托于中科院力学所，参研单位包括：中国科学院大学、中国科学技术大学、中科院金属所、中科院上海硅酸盐所、中科院化学所、中科院数学与系统科学院、中科院计算机网络信息中心、中科院工程热物理所等，相关单位在各自领域具有长期的工作积累，一流的软硬件设施，能够保障专项的顺利实施。

专项凝聚了一大批青年才俊，具有雄厚的研究基础和出色的研究实力。核心团队130余人，包括：院士4人、“杰青”13人、“百人”14名、“青千”2名、“优青”4名。核心团队中40岁以下骨干人员67人，约占总数的50%。核心团队涵盖了力学、化学、材料、数学与计算等多学科领域的优秀研究力量，优势互补。此外，还聘请了4位资深院士担任学术顾问。

3 拟解决的科学问题和关键技术

该专项将采取系统力学的观点，以重大需求为例，建立系统层面核心技术要求与主要影响因素之间的内在关系，分析以往研究存在的困难、现有技术难以突破的原因，提出新的系统解决方案，并通过试验验证，形成标志性研究成果。在解决国家重大需求的同时，探索系统力学的新理论、新方法。

在高超声速巡航飞行研究方面，将重点建立高超声速巡航飞行新理论，突破高超声障，形成高超声速巡航飞行器一体化技术；在高速列车长时间服役安全性研究方面，将重点建立非定常载荷谱分量理论预测方法，气动载荷与地基、轮轨、车体、弓网等的相互耦合关系，分量载荷谱与寿命预测方法等；在深海油气水高效分离与输运技术研究方面，将重点建立多相强旋流稳定性理论与控制方法，突破深海条件下轴向起旋径向分离关键技术和深海长距离油气输运技术；此外，针对复杂介质系统，将重点揭示复杂介质不同层级结构的多相流动和多过程耦合作用规律及内在机制、极端条件下流动和传热的非平衡效应以及流固耦合行为、复杂服役环境中多级结构材料的微结构演化与宏观力学响应的关联机制、复杂介质中的纳微流动机制与输运规律、先进材料离散到连续过渡的跨尺度理论表征与微结构起源。

4 预期成果

专项有望在原创理论、关键技术、人才队伍等方面取得如下成果。

原创理论。高超声速巡航飞行理论；非定常载荷谱分量预测方法；多相强旋流稳定性与控制方法；复杂介质系统的多因素多过程非线性耦合理论；跨时空尺度的力学理论与方法。

关键技术。高超声速巡航飞行器一体化设计技术；高速列车载荷谱分布预测技术；深海油气水高效分离技术；抗冲击材料结构功能一体化设计技术。

基于最佳速度火箭高超声速巡航飞行方案，研制满足实用要求的火箭高超声速巡航原理样机，并进行飞行试验验证；高速列车主要部件寿命影响因素贡献量和系统优化方案，延寿方案用于 CRH380 型高速列车关键部件改进，并在京广线进行试验验证；深海水下油气水分离系统、计量系统、可视化监控系统设计方案，并进行管道式高效油气水分离系统和井下分离器的深海模拟环境试验验证。

学科建设与人才。探索和发展系统力学的概念、理论和方法，凝聚系统力学研究队伍，培养系统力学前沿与交叉领域的高端研究人才：若干具有国际影响力的学科带头人、4—6 名“杰青”或“优青”、百名以上优秀研究生。发表高水平期刊论文 200 篇以上，申请发明专利 20 项以上，软件著作权 2—3 项，出版专著 2—3 部。形成国际独具特色的系统力学研究中心。

（依托单位：中科院力学所）